

Управление положением лазерного пучка по обратному аэрозольному рассеянию. Модельный эксперимент

Р.Ш. Цвык, В.М. Сазанович, А.Н. Шестернин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.08.2011 г.

Представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований возможности компенсации рассогласования осей фокусированного в аэрозольном объеме лазерного пучка и приемного телескопа по смещению изображения, формируемого лазерным пучком рассеивающего объема в аэрозольной камере с искусственными аэрозолями размером 0,5–0,6 мкм. Показано, что рассогласование осей пучка и приемного телескопа может быть скомпенсировано с точностью до нескольких микроградусов путем управления положением центра тяжести распределения интенсивности изображения, формируемого пучком рассеивающего объема, построенного приемным телескопом.

Ключевые слова: лазерный пучок, обратное аэрозольное рассеяние, рассогласование оптических осей; laser beam, aerosol backscattering, misalignment of optical axes.

Введение

На протяженных трассах в атмосфере могут происходить отклонения пространственно ограниченных лазерных пучков от заданного направления распространения. Эти отклонения могут быть случайными за счет крупномасштабных, соизмеримых с поперечными размерами пучка, турбулентных неоднородностей в атмосфере [1] либо вызываться начальными регулярными аберрациями волнового фронта пучка, возникающими в оптическом тракте передающего телескопа [2]. На высотных трассах в атмосфере влияние турбулентности на распространение лазерного излучения невелико и основным фактором, определяющим отклонение оси лазерного пучка от заданного направления, являются общие аберрационные наклоны начального волнового фронта пучка.

В работах [2–9] выполнен цикл теоретико-численных исследований возможности компенсаций искажений начального волнового фронта пучка с использованием для замыкания обратной связи в адаптивной системе коллимации волнового фронта сигнала обратного атмосферного рассеяния излучения либо вспомогательного «зондирующего», либо самого основного пучка. В частности, в [8] анализируются возможности компенсации отклонения оси лазерного пучка от заданного направления распределения по смещению изображения подсвечиваемого пучком атмосферного рассеивающего объема.

В настоящей статье приведены результаты лабораторных экспериментальных исследований возможности совмещения оси фокусированного лазерного пучка с заданным направлением по смещению изображения подсвечиваемого пучком рассеивающего объема. Измерялся энергетический центр изображения фокального пятна лазерного пучка, распространяющегося в рассеивающей среде. Исследования проводились на специально созданном экспериментальном стенде.

Аппаратура и методика измерений

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда для исследования возможности управления положением фокусированного лазерного пучка по обратному рассеянному излучению в аэрозольной среде.

Лазерный пучок диаметром 100 мм, длина волны 0,532 мкм, мощность 700 мВт, фокусируется передающей оптической системой в трубе, наполненной аэрозольными частицами, на расстоянии $L_{\text{ф}} = 5,75$ м от приемного параболического зеркала (ЗП). Паспортный размер частиц 0,5–0,6 мкм. Обратное рассеянное излучение принимается внесевым параболическим зеркалом диаметром 200 мм с фокусным расстоянием $F = 782$ мм. В плоскости изображения $l_{\text{и}}$, соответствующей дальности фокусировки пучка, установлена цифровая видеокамера CONTOUR IR digital форматом 1024 × 1280 пикселей без оптики.

Видеокамера установлена на столике, который перемещается микровинтами перпендикулярно (координаты x , y) и вдоль оси зеркала (координата z). Сигнал с видеокамеры передается в персональный

* Рувим Шахнович Цвык (tsvyk@iao.ru); Валентина Михайловна Сазанович (sazanovich@iao.ru); Андрей Николаевич Шестернин (san@iao.ru).

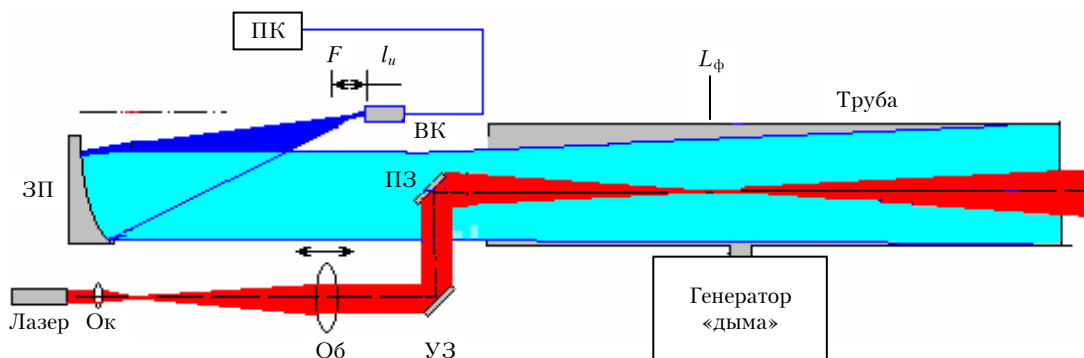


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: ЗП – приемное внеосевое параболическое зеркало; F – положение фокальной плоскости ЗП; l_u – расстояние от фокальной плоскости ЗП до плоскости изображения фокуса лазерного пучка; ВК – видеокамера; ПК – персональный компьютер; передающая оптическая система, включающая: ПЗ – плоское зеркало; УЗ – управляемое зеркало; Ок, Об – окуляр и объектив оптической системы, формирующей лазерный пучок; L_ϕ – расстояние от объектива до плоскости фокусировки лазерного пучка

компьютер (ПК), на мониторе которого осуществляется визуализация распределения интенсивности в плоскости изображения и рассчитываются координаты энергетического центра тяжести относительно центра матрицы и их изменение в процессе компенсации отклонения изображения от центра матрицы по алгоритму, рассмотренному ниже.

Энергетический центр тяжести распределения интенсивности в изображении рассеивающего объема отождествляется с осью пучка. При этом предполагается, что ось телескопа совмещена с центром матрицы видеокамеры (координаты $x = 0$, $y = 0$). Измеренные координаты центра тяжести используются для выработки команд электронным блоком управления для поворота управляемого зеркала (УЗ). В соответствии с итерационным алгоритмом [8] центр тяжести изображения совмещается с центром матрицы видеокамеры, осуществляя компенсацию отклонения оси пучка. Количество подвижек поворотного зеркала отображается на экране монитора ПК в отдельном окне.

Разработанный на основе микропроцессоров электронный блок управления обеспечивает поворот УЗ по двум координатам с помощью двух микровинтов 8MS00-25, вращаемых шаговыми двигателями. Режим работы шаговых двигателей (ШД): 1, 1/2, 1/4, 1/8 шага (длина перемещения 0–25 мм, один шаг равен 1,25 мкм, разрешение 0,156 мкм – 1/8 шага).

При отклонении пучка от центра матрицы на расстояние, превышающее радиус пучка, используется полный шаг перемещения. Вблизи центра матрицы шаг уменьшается до 1/8, обеспечивая точность удержания изображения на центре матрицы. УЗ диаметром 100 мм закреплено в изготовленном поворотном устройстве с двумя степенями свободы, позволяющем изменять угол наклона по двум координатам.

Электронный блок управления задает режим работы биполярных двухфазных шаговых двигателей: максимальные значения тока от 0,25 до 1,4 А; напряжение источника питания ШД в диапазоне от 9 до 18 В; защита ШД от перегрева, перегрузки по току и напряжению. Блок оснащен интегрированным разъемом USB (эмулятор RS-232), что позволяет использовать блок на ноутбуках с отсутствующим

разъемом RS-232. Эмулятор RS-232 обеспечивает возможность программирования скорости перемещения, ускорения и торможения шаговых двигателей.

При настройке экспериментальной установки сначала в фокусе лазерного пучка размещался экран, а видеокамера – в плоскости резкого изображения пучка, которое строится внеосевым параболическим зеркалом. Затем экран снимался и на пути пучка устанавливалась труба размером $0,6 \times 0,6 \times 4$ м, которая заполнялась аэрозолем от генератора «дыма». Фокус лазерного пучка располагался в рассеивающем объеме на расстоянии 1,5 м от начала трубы. Измерения начинались после установления распределения плотности дыма в трубе, близкого к равномерному и обеспечивающего достаточную мощность обратно рассеянного сигнала для получения изображения на видеокамере.

Алгоритм управления направлением оси лазерного пучка

Применение видеокамеры в эксперименте позволяло моделировать работу различных типов координатных фотоприемников путем изменения алгоритма обработки кадров. Компенсация угловых отклонений осуществлялась путем имитации либо матричного фотоприемника с числом элементов 1024×1280 , когда при обработке кадра использовалась вся приемная матрица видеокамеры, либо разрезного фотодетектора с числом элементов 2×2 . В последнем случае матрица видеокамеры делилась на 4 площадки. За начало координат $x = 0$, $y = 0$ принимался центральный элемент матрицы (пиксель с координатами $x = 512$, $y = 640$).

В программном обеспечении блока управления поворотным зеркалом при имитации квадрантного фотодетектора реализован итерационный алгоритм [8]. На рис. 2 показано расположение 4 площадок фотодетектора в системе координат с центром в точке $x = 0$ и $y = 0$.

Регистрируемые сигналы J_{11} , J_{12} , J_{21} и J_{22} рассчитывались как сумма сигналов с каждого элемента матрицы в пределах каждой площадки. Угловой размер каждой площадки равен $\gamma = L / (F + l_u)$, где L –

размер площадки; $F + l_n$ — расстояние от ЗП до плоскости изображения рассеивающего объема.

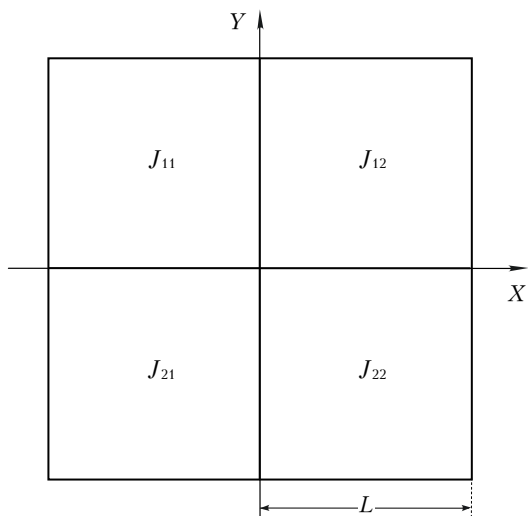


Рис. 2. Схема расположения площадок квадрантного фотодетектора

Координаты $\{\gamma_{cx}, \gamma_{cy}\}$ энергетического центра распределения интенсивности в плоскости фотодетектора рассчитываются по известным формулам:

$$\gamma_{cx} = \frac{(J_{12} - J_{11}) + (J_{22} - J_{21})}{J_{11} + J_{12} + J_{21} + J_{22}}, \quad (1)$$

$$\gamma_{cy} = \frac{(J_{11} - J_{21}) + (J_{12} - J_{22})}{J_{11} + J_{12} + J_{21} + J_{22}}. \quad (2)$$

Очевидно, что если центр тяжести пятна находится далеко от оптической оси, например вблизи края двух чувствительных площадок фотодетектора, то погрешность оценки координат $\{\gamma_{cx}, \gamma_{cy}\}$ будет большой. Поэтому применяется итерационная процедура,

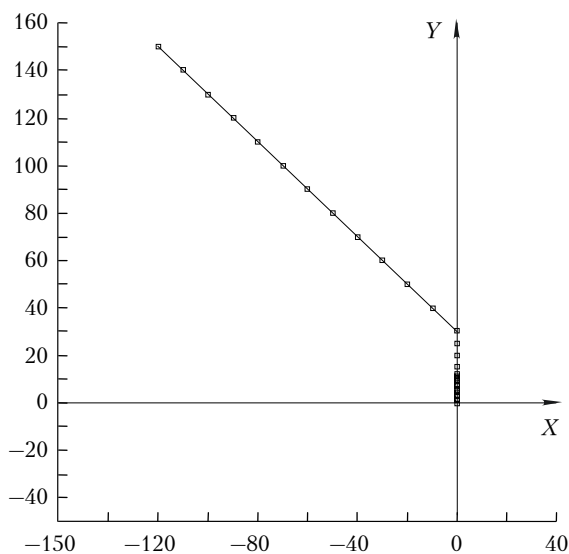


Рис. 3. Алгоритм компенсации смещений при имитации работы квадрантного (разрезного) фотодетектора. По осям отложены сдвиги в шагах двигателя

где каждая из итераций включает в себя измерение $\{\gamma_{cx}, \gamma_{cy}\}$ и (в соответствии с результатом измерения) корректировку разъюстировки оптических осей лазерного пучка и передающего телескопа.

При расположении пучка в одном квадранте $\gamma_{cx} = \gamma_{cy} = 1$. В этом случае определялся номер площадки, а изображение перемещалось под углом 45° по направлению к центру фотодетектора до тех пор, пока не появлялся сигнал хотя бы еще с одной из площадок (одна из координат отличалась от 1). Дальнейшая компенсация происходила по траектории, близкой к кратчайшей до центра матрицы (рис. 3).

При имитации матричного фотоприемника (используется вся приемная матрица видеокамеры) рассчитывались классические координаты положения центра тяжести (ЦТ) изображения рассеивающего объема и компенсация осуществлялась по траектории, близкой к кратчайшей до центра матрицы (рис. 4).

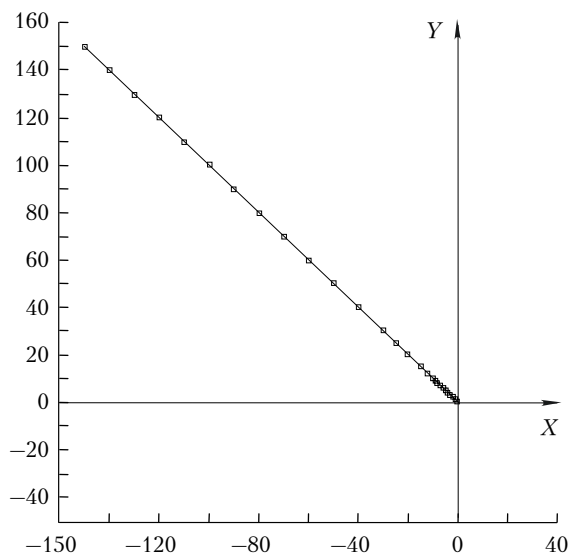


Рис. 4. Алгоритм компенсации смещений при имитации работы матричного фотодетектора. По осям отложены сдвиги в шагах двигателя

Аналогичный алгоритм совмещения может быть использован при применении координатно-чувствительного фотоприемника.

Результаты исследований

На рис. 5 показан пример распределения интенсивности обратно рассеянного излучения лазерного пучка на приемной матрице видеокамеры, соответствующего распределению интенсивности пучка на экране в динамике в процессе компенсации.

Видно, что в результате итерационного процесса компенсации введенного начального рассогласования осей пучка и приемного телескопа засвечиваемое пятно на матрице устанавливается в ее центре.

На рис. 6 приведен пример реализации изменения угла разъюстировки оптических осей лазерного пучка и приемного телескопа в результате подвижек поворотного зеркала по оси x (а) и по оси y (б).

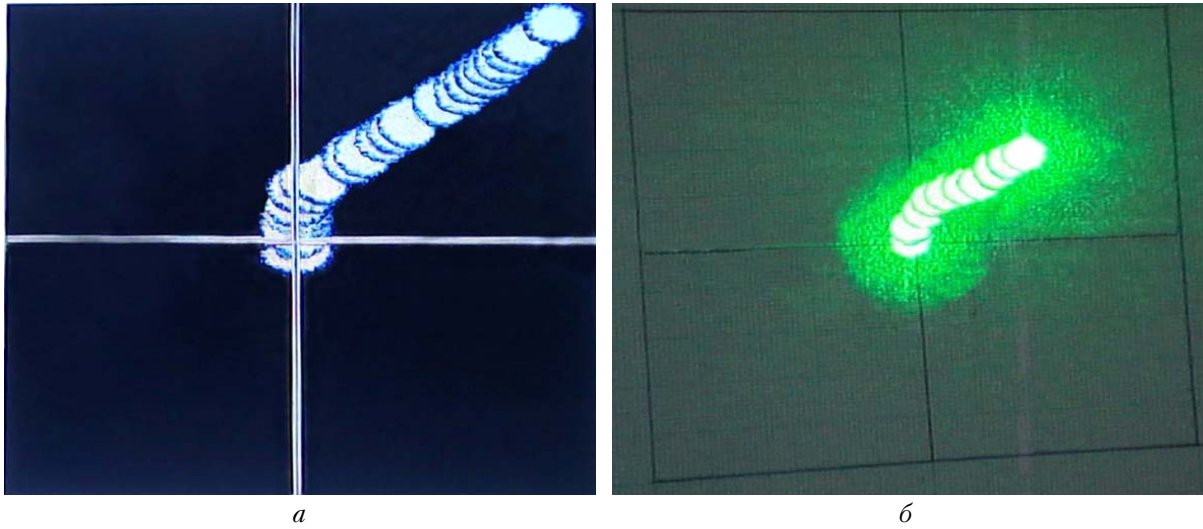


Рис. 5. Пример распределения интенсивности на матрице (а) и экране (б) при работе алгоритма по компенсации разъюстировки оптических осей лазерного пучка и приемного телескопа. Представлено суммарное изображение по отдельным мгновенным снимкам лазерного пучка в одной из реализаций

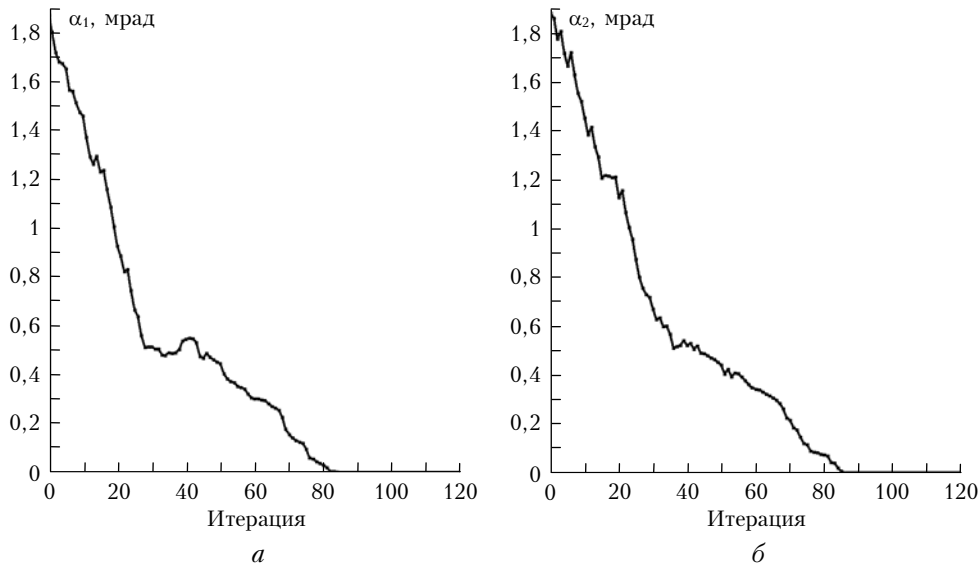


Рис. 6. Изменение угла разъюстировки оптических осей в процессе компенсации

По оси ординат указаны угловые смещения ЭЦТ светового пятна на приемной матрице относительно ее центра в миллирадианах, по оси абсцисс — число итераций. Видно, что для полной компенсации начальной разъюстировки осей примерно в 2 мрад требуется 80–90 итераций.

Работа моторизированных микровинтов по компенсации разъюстировки оптических осей лазерного пучка и телескопа: по координате x (а), по координате y (б), показана на рис. 7.

На микровинты через блок управления последовательно подаются команды после измерения координат центра тяжести светового пятна на матрице видеокамеры. По оси ординат на рис. 7 значения шага микровинта указаны в мкм относительно оси приемного телескопа, совмещенного с центром матрицы. По оси абсцисс отложен номер итерации с момента включения управления. Видно, что пучок удержива-

ется на оси приемной системы в пределах 0,15 мкм (1/8 шага двигателя).

Минимальный шаг использовавшегося в эксперименте микровинта 8MS00-25 для управления поворотным зеркалом составляет 1,25 мкм. Расстояние от микровинта до оси вращения зеркала равно 60 мм.

Таким образом, угол поворота зеркала за один шаг микровинта на краю зеркала составляет примерно $2 \cdot 10^{-5}$ рад. С учетом того что режим работы микровинта допускает дробность шага до 1/8, минимальная угловая подвижка зеркала равна примерно $2,5 \cdot 10^{-6}$ рад, т.е. в отсутствие шумов приемника и регулярных aberrаций волнового фронта пучка возможна компенсация рассогласования осей лазерного пучка и приемного телескопа с погрешностью, не превышающей 2,5 мкрад.

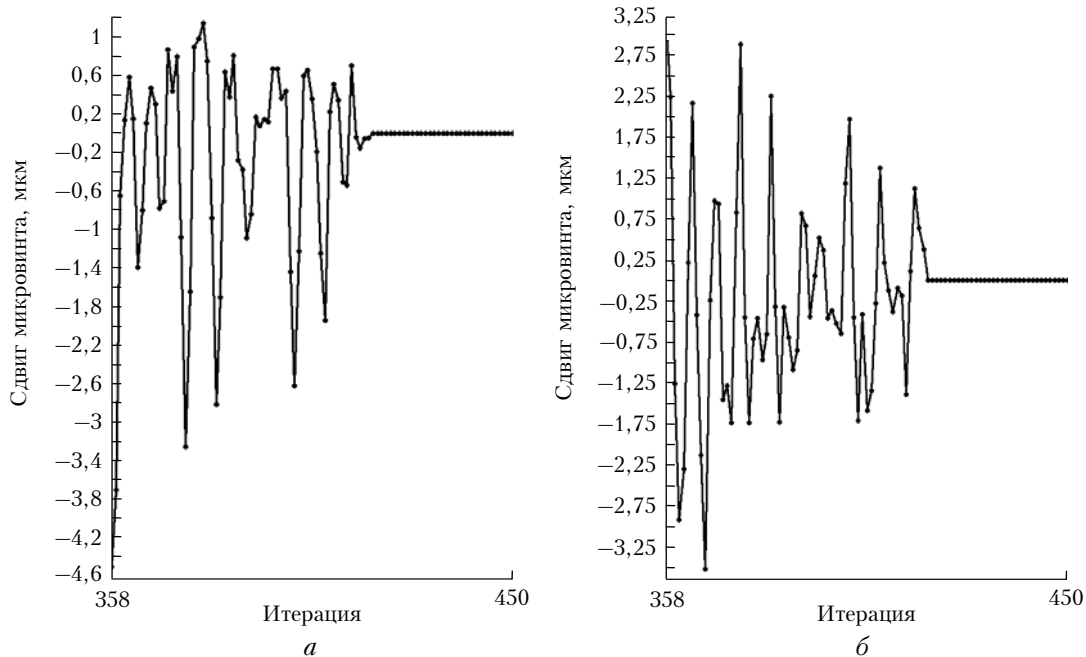


Рис. 7. Работа моторизированных микролинз по компенсации разъюстировки оптических осей лазерного пучка и приемного зеркала

Заклучение

Результаты выполненных лабораторных экспериментальных исследований показали возможность использования обратного аэрозольного рассеяния для совмещения оси лазерного пучка с осью приемной системы. Показано, что при использовании разрезных (квадрантных) фотоприемников управление положением пучка в пространстве возможно в пределах углового размера изображения рассеивающего объема. Применение координатно-чувствительных и матричных фотоприемников дополнительно позволяет определять (управлять) положение оси лазерного пучка в пространстве в пределах поля зрения приемной системы. Из результатов эксперимента следует, что достижимая точность совмещения оси лазерного пучка с осью приемной системы составляет $5 \cdot 10^{-6}$ мкм.

Авторы выражают благодарность В.А. Банаху, В.В. Жмылевскому, А.Б. Игнатьеву, В.В. Морозову и И.Н. Смалихо за обсуждение результатов работы и критические замечания.

1. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.
2. Zhmylevski V.V., Ignatiev A.B., Konyayev Yu.A., Morozov V.V. To the problem of backscattered radiation using for closing of adaptive loop // The XI J. Int. Sympos. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics»: Abstracts. Tomsk, 2004. 92 p.
3. Банах В.А. Моделирование изображения подсвечиваемого лазером рассеивающего слоя в турбулентной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 303–307.

сфере // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 303–307.

4. Банах В.А., Рычков Д.С., Жмылевский В.В., Морозов В.В. Средняя мощность частично когерентного лазерного пучка, рассеянного на атмосферном слое // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 953–958.
5. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Рычков Д.С. О возможности использования обратного аэрозольного рассеяния в адаптивной контуре атмосферных оптических систем // Квант. электрон. 2008. Т. 38, № 8. С. 764–768.
6. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Канев Ф.Ю., Морозов В.В., Рычков Д.С. Коррекция фазовых искажений лазерных пучков по сигналу обратного рассеяния в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 3. С. 289–295.
7. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н. Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108, № 1. С. 113–122.
8. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н. Наведение частично когерентного лазерного пучка по обратному атмосферному рассеянию // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 103. С. 885–894.
9. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н. Компенсация абберационных искажений волнового фронта импульсного лазерного пучка по сигналу обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111, № 3. С. 1488–1496.

R.Sh. Tsvyk, V.M. Sazanovich, A.N. Shesternin. Pointing of a laser beam based on laser beam aerosol backscattering. Modeling experiment.

The experimental results of study of a possibility of the laser beam pointing based on laser beam backscattered radiation, received by the telescope, are presented. As a pointing control signal the displacements of the energy centroid of the image of the aerosol scattering volume, formed by a laser beam, are used. The experiments were performed in the aerosol chamber with artificial aerosol of 0.5–0.6 μm in size. It is shown that the laser beam pointing by such a way is possible within accuracy of a few mikroradians.